

19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift  
10 DE 195 32 409 A 1

51 Int. Cl.<sup>8</sup>:  
F 03 D 7/00

21 Aktenzeichen: 195 32 409.9  
22 Anmeldetag: 1. 9. 95  
43 Offenlegungstag: 6. 3. 97

DE 195 32 409 A 1

71 Anmelder:  
Wobben, Aloys, 26607 Aurich, DE

74 Vertreter:  
Eisenführ, Speiser & Partner, 28195 Bremen

72 Erfinder:  
gleich Anmelder

56 Entgegenhaltungen:  
Gasch, Robert: Windkraftanlagen, B.G. Teubner  
Stuttgart, 1993, S. 303 ff.;  
Hein, Erich: Windkraftanlagen, Springer Verlag  
Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo,  
1988, S. 323 f., S. 330 ff.;

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage und eine zugehörige Windenergieanlage

57 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage, insbesondere zur Begrenzung der Belastung einer Windenergieanlage, vorzugsweise einer pitchge-regelten Windenergieanlage. Weiter betrifft die Erfindung eine zugehörige Windenergieanlage.  
Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, den Ertrag einer Windenergieanlage zu erhöhen und dennoch die Belastung der Windenergieanlage bei höheren Windgeschwindigkeiten zu begrenzen.  
Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die Leistung der Windenergieanlage windgeschwindigkeits-abhängig ab einer vorbestimmbaren Windgeschwindigkeit vermindert wird, vorzugsweise, indem die Betriebsdrehzahl des Rotors der Windenergieanlage bei Auftreten eines Windes mit einer Windgeschwindigkeit oberhalb einer Gren-zwind- oder -anströmgeschwindigkeit reduziert wird.

DE 195 32 409 A 1

1  
Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage, insbesondere zur Begrenzung der Belastung einer Windenergieanlage, vorzugsweise einer pitchgeregelten Windenergieanlage. Weiter betrifft die Erfindung eine zugehörige Windenergieanlage.

Die Rotorblätter des Rotors einer Windenergieanlage werden durch den auf sie wirkenden Staudruck belastet, der von den herrschenden Windverhältnissen, insbesondere von der Windgeschwindigkeit des herrschenden Windes abhängt. Dieses Abhängigkeitsverhältnis ergibt sich aus:

$$q = \frac{\rho}{2} \cdot v^2, \quad (1)$$

wobei  $q$  der wirksame Staudruck,  $\rho$  die Luftdichte und  $v$  zunächst einmal die Anströmgeschwindigkeit des Windes am Profil ist.

Die Anströmgeschwindigkeit  $v$  setzt sich vektoriell aus der tatsächlichen Windgeschwindigkeit  $v_w$  und der örtlichen Umfangsgeschwindigkeit  $v_u$  an einem Ort des Rotorblattes zusammen.

Dabei ist:

$$v_u = r \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60}, \quad (2)$$

wobei  $n$  die Rotordrehzahl ist und  $r$  der betrachtete Rotorradius ist.

Für den Fall, daß die tatsächliche Windgeschwindigkeit  $v_w$  senkrecht zur Umfangsgeschwindigkeit  $v_u$  steht, der herrschende Wind also frontal bzw. axial auf den Rotor der Windenergieanlage bläst, ergibt sich mit Hilfe des Satzes von Pythagoras:

$$v = \sqrt{v_u^2 + v_w^2}. \quad (3)$$

In diesem Falle ist außerdem der Anströmwinkel  $\alpha$ , also der Winkel zwischen der Anströmgeschwindigkeit  $v$  und der Umfangsgeschwindigkeit  $v_u$  zu berechnen aus:

$$\tan \alpha = \frac{v_w}{v_u}. \quad (4)$$

Die am Blattprofil wirkende Kraft wird mit den Profildaten ermittelt, nämlich als:

$$F_A = q \cdot A \cdot c_\alpha, \quad (5)$$

wobei  $F_A$  die auf das Blattprofil wirkende Kraft ist,  $q$  der wirksame Staudruck ist,  $A$  die angeströmte Fläche bzw. Bezugsfläche des Rotorblattes ist und  $c_\alpha$  die Profilpolare als Funktion des Anströmwinkels  $\alpha$  ist.

In dem hier interessierenden Bereich kann die Profilpolare  $c_\alpha$  annähernd linear beschrieben werden als:

$$c_\alpha = \text{konst.} \cdot \alpha, \quad (6)$$

bzw. für kleine Winkel (im Bogenmaß):

$$\alpha (v_w \ll v_u): \tan \alpha \approx \alpha. \quad (7)$$

Daraus folgt mit Gleichung (4):

$$c_\alpha = \text{konst.} \cdot \frac{v_w}{v_u}. \quad (8)$$

Weiter folgt mit Gleichung (5):

$$F_A = \frac{\rho}{2} \cdot (v_u^2 + v_w^2) \cdot A \cdot \text{konst.} \cdot \frac{v_w}{v_u}, \quad (9)$$

bzw. unter Zusammenfassung der konstanten Glieder:

$$F_A = \text{konst.} \cdot (v_u^2 + v_w^2) \cdot \frac{v_w}{v_u}. \quad (10)$$

Natürlich steht der Geschwindigkeitsvektor des anströmenden Windes  $v_w$  nicht immer senkrecht auf der Umfangsgeschwindigkeit  $v_u$ , so daß Gleichung (3) nicht immer gilt. Die vorhergehenden Gleichungen lassen jedoch zumindest qualitativ Abhängigkeiten der verschiedenen Parameter von einander erkennen.

Insbesondere ist aus der Gleichung (1) zu entnehmen, daß der Rotor der Windenergieanlage belastende wirksame Staudruck  $q$  quadratisch von der Anströmgeschwindigkeit  $v$  abhängt.

Die jeweilige Windenergieanlage kann also ab einer bestimmten maximalen Anströmgeschwindigkeit  $v_{\max}$  ihre Belastungsgrenze erreichen.

Zur Begrenzung der Belastung einer Windenergieanlage im Sinne des Verfahrens der eingangs genannten Gattung wurde bisher eine Windenergieanlage bei Erreichen einer maximalen Windgeschwindigkeit  $v_{w\max}$  abgeschaltet. Insbesondere bei Windparks führt eine solche Abschaltung, bei der alle Windenergieanlagen des Windparks bei Erreichen der Abschaltwindgeschwindigkeit nahezu zeitgleich abschalten, bzw. das Wiederanschalten nach einer solchen Abschaltung bei nachlassendem Wind zu starken Leistungsgradienten, die sich durch eine plötzliche Spannungsänderung im elektrischen Netz, an dem diese Windenergieanlagen angeschlossen sind, bemerkbar machen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, den Ertrag einer Windenergieanlage zu erhöhen und dennoch die Belastung der Windenergieanlage bei höheren Windgeschwindigkeiten zu begrenzen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die Leistung der Windenergieanlage windgeschwindigkeitsabhängig ab einer vorbestimmbaren Windgeschwindigkeit vermindert wird, vorzugsweise indem die Betriebsdrehzahl des Rotors der Windenergieanlage bei Auftreten eines Windes mit einer Windgeschwindigkeit oberhalb einer Grenzwind- oder -anströmgeschwindigkeit reduziert wird.

Aus den obengenannten Gleichungen (1), (3) und (10) ist, jedenfalls qualitativ, erkennbar, daß der das Rotorblatt belastende Staudruck, ebenso wie die am Blattprofil wirkende und somit das Rotorblatt belastende Kraft, jeweils von der Umfangsgeschwindigkeit  $v_u$  und somit

also von der Betriebsdrehzahl des Rotors abhängt. Zur Begrenzung der Belastung des Rotors der Windenergieanlage kann also bei steigender Windgeschwindigkeit  $v_w$  bzw. bei einer ungünstigen Anströmrichtung (je nachdem, welcher Parameter als Meßgröße genommen wird), die jeweils zum ungünstigen Anwachsen der resultierenden Anströmgeschwindigkeit  $v$  führen könnten, einem Anwachsen der Belastung durch eine Reduzierung der Drehzahl, also der Umfangsgeschwindigkeit, des Rotors entgegengewirkt werden.

Anders als bisher vorgesehen, wird also erfindungsgemäß mit Vorteil nicht die Windenergieanlage bei Erreichen einer Grenzgeschwindigkeit vollständig abgeschaltet werden und diese Grenzgeschwindigkeit also als Abschaltgeschwindigkeit definiert, sondern die Windenergieanlage wird lediglich zwangsweise in ihrer Betriebsdrehzahl reduziert, sobald die Anströmgeschwindigkeit  $v$  über den Wert der Grenzgeschwindigkeit anwächst. Die Windenergieanlage kann also oberhalb der üblichen "Abschaltgeschwindigkeit" weiter betrieben werden, wodurch ihre Leistungskennlinie zu größeren Windgeschwindigkeiten verlängert und der Energieertrag und die Netzverträglichkeit der Windenergieanlage verbessert werden. Insbesondere können durch die zwangsweise Betriebsdrehzahlreduzierung bei pitchgeregelten Windenergieanlagen die Belastungen durch die Erfindung in günstiger Weise begrenzt werden. Es werden durch die Erfindung zu starke, wechselnde Belastungen der Rotorblätter und damit zu unsymmetrische, pulsierende Belastungen der ganzen Anlage, die mit steigender Windgeschwindigkeit zunehmen, vermieden.

Möglichkeiten zur Betriebsdrehzahlreduzierung sind für andere als den erfinderischen Zweck an sich hinreichend bekannt. Eine Reduzierung der Betriebsdrehzahl kann bei einer pitchgeregelten Windenergieanlage z. B. einfach durch eine aktive Blattverstellung erreicht werden. Dies bedeutet, daß durch Änderung des Anstellwinkels des Blattprofils des Rotors der Auftrieb am Rotorblatt beeinflußt wird, und damit eine Reduzierung der Rotordrehzahl erzielt werden kann. In Verbindung mit einem drehzahlvariabel betriebenen Antriebsstrang, z. B. für einen Pumpenbetrieb, die Netzeinspeisung über Wechselrichter oder dgl., wird weiterhin ein Produktionsbetrieb ermöglicht.

Eine Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens sieht vor, daß die Drehzahl des Rotors derart reduziert wird, daß das auf den Rotor der Windenergieanlage wirkende Belastungsniveau bei steigender Windgeschwindigkeit oberhalb der Grenzgeschwindigkeit annähernd konstant bleibt oder reduziert wird. Auf diese Weise kann vermieden werden, daß der Antriebsstrang der Windenergieanlage überlastet wird. Gleichzeitig wird hierdurch bei steigender Windgeschwindigkeit die abgegebene Leistung gedrosselt.

Eine erfindungsgemäße Windenergieanlage zeichnet sich durch eine Einrichtung aus, die eine automatische Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens gewährleistet.

In der Zeichnung sind beispielhafte Erläuterungen zur Erfindung dargestellt. Es zeigen:

Fig. 1 eine Leistungs- bzw. Drehzahlkennlinie einer erfindungsgemäßen Windenergieanlage als Funktion der Windgeschwindigkeit,

Fig. 2 eine Vektordarstellung zur Erläuterung der Anströmgeschwindigkeit an einem Rotorblatt einer Windenergieanlage und

Fig. 3 eine typische Profilpolare.

Die Fig. 1 gibt die Leistungskennlinie und die Drehzahlkennlinie einer erfindungsgemäß betriebenen Windenergieanlage als Funktion der Windgeschwindigkeit  $v_w$  wieder.

In der Figur sind die Leistung  $P$  und die Drehzahl  $n$  der Windenergieanlage gegenüber der Windgeschwindigkeit  $v_w$  aufgetragen. Die Leistung  $P$  soll bis zum Erreichen einer bestimmten Nenngeschwindigkeit relativ schnell ansteigen und dann bis zum Erreichen einer Grenzgeschwindigkeit  $v_{wmax}$ , der bisherigen Abschaltgeschwindigkeit, möglichst konstant gehalten werden. Bei bisheriger Betriebsweise einer Windenergieanlage würde die Leistungskennlinie bei Erreichen der Grenzgeschwindigkeit  $v_{wmax}$  abbrechen, weil die Windenergieanlage an dieser Stelle abgeschaltet würde. Die in der Figur gezeigte Leistungskennlinie einer erfindungsgemäß betriebenen Windenergieanlage zeigt jedoch einen erweiterten Leistungskennlinienbereich, der über die Grenzgeschwindigkeit  $v_{wmax}$ , die frühere Abschaltgeschwindigkeit, hinausführt. Es ist erkennbar, daß in dem Windgeschwindigkeitsbereich oberhalb der früheren Abschaltgeschwindigkeit jetzt die Leistung bzw. die Drehzahl lediglich gedrosselt wird, so daß die Belastung der Windenergieanlage in diesem Windgeschwindigkeitsbereich begrenzt ist und dennoch ein Weiterbetrieb der Windenergieanlage erfolgt.

Die Fig. 2 zeigt eine Vektordarstellung zur Erläuterung der Anströmgeschwindigkeit an einem Rotorblatt einer Windenergieanlage. Diese Figur dient insbesondere zur Erläuterung der in der Beschreibungseinleitung gegebenen Gleichungen (3)–(5).

Eine weitere Erläuterung der in der Beschreibungseinleitung gegebenen Gleichungen (5)–(8) liefert die Fig. 3, die eine typische Profilpolare zeigt.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage, dadurch gekennzeichnet, daß ihre Leistung ab Erreichen einer die Windenergieanlage überbelastungsgefährdenden Windgeschwindigkeit abhängig vom (weiteren) Anstieg der Wind- oder Anströmgeschwindigkeit vermindert wird.

2. Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage, insbesondere zur Begrenzung der Belastung einer Windenergieanlage, vorzugsweise einer pitchgeregelten Windenergieanlage, vorzugsweise nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Betriebsdrehzahl des Rotors der Windenergieanlage bei Auftreten eines Windes mit einer Windgeschwindigkeit oberhalb einer Grenzwind- oder -anströmgeschwindigkeit reduziert wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Betriebsdrehzahl ( $n$ ) des Rotors derart reduziert wird, daß das auf den Rotor der Windenergieanlage wirkende Belastungsniveau bei steigender Windgeschwindigkeit oberhalb der Grenzgeschwindigkeit annähernd konstant bleibt oder reduziert wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Drehzahlreduzierung mit einer auf das Belastungsniveau abgestimmten Leistungsänderung verbunden ist.

5. Windenergieanlage, gekennzeichnet durch, eine Einrichtung zur automatischen Leistungsverminderung ab Erreichen einer die Windanlage überbelastungsgefährdenden Windgeschwindigkeit abhängig vom weiteren Anstieg der Wind- oder Anströmge-

schwindigkeit bzw. der wahren oder relativen  
Windgeschwindigkeit.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

Fig. 1

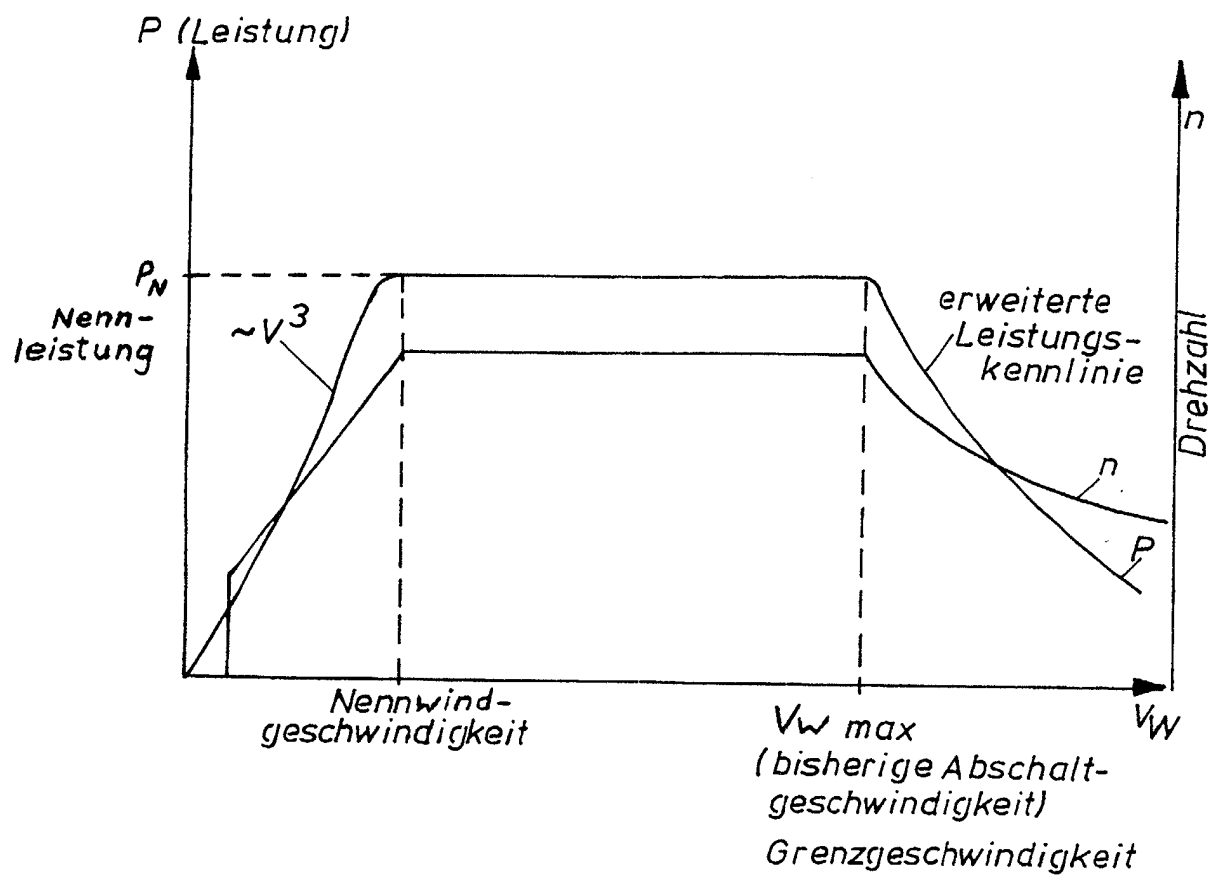


Fig.2

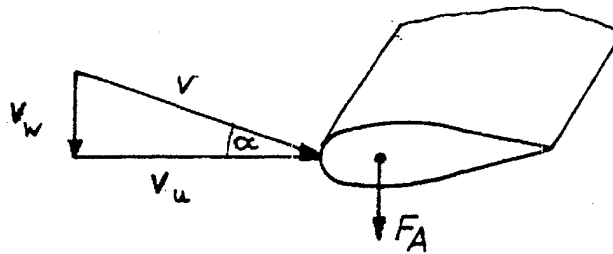


Fig.3

